

dr hab. inż. Andrzej Bęben  
Instytut Telekomunikacji  
Politechnika Warszawska

### **Recenzja rozprawy doktorskiej**

Tytuł rozprawy: Efficient communication algorithms in shared channels with adversary

Autor rozprawy: mgr inż. Ilya Hradovich

Promotor rozprawy: prof. dr hab. Marek Klonowski

Promotor pomocniczy: prof. dr Dariusz R. Kowalski

Dziedzina rozprawy: nauki techniczne

Dyscyplina: Informatyka Techniczna i Telekomunikacja

#### **1 Syntetyczne przedstawienie rozprawy**

Rozprawa doktorska mgr. inż. Ilyi Hradovicha, pt. „Efficient communication algorithms in shared channels with adversary” została opracowana w Instytucie Podstaw Informatyki, Polskiej Akademii Nauk. Promotorem pracy jest prof. dr hab. Marek Klonowski, a promotorem pomocniczym jest prof. dr Dariusz R. Kowalski. Celem rozprawy jest opracowanie nowych, efektywnych algorytmów sterowania MAC (Multiple-access Channel) dostępem stacji do współdzielonego łącza transmisyjnego. W rozprawie zaproponowano kilka wersji algorytmu MAC i dla każdej z nich zaproponowano zależności analityczne umożliwiające wyznaczenie wartości dokładnych lub górnych ograniczeń dla parametrów sprawności przekazu pakietów. Proponowane rozwiązania zakładają pełną synchronizację zegarów stacji w sieci dostępowej, a także podział czasu na dyskretne chwile, nazywane w rozprawie rundami, w których to stacje mogą rozpoczynać transmisję danego pakietu. Ponadto, założono, że stacje mogą zmieniać swój stan pomiędzy aktywnym i nieaktywnym, co pozwala modelować sieci z ograniczoną dostępnością stacji.

W ramach rozprawy: 1) przedstawiono wnikliwą analizę aktualnego stanu badań dotyczących metod dostępu do medium transmisyjnego oraz zaproponowano systematyczną klasyfikację tych metod; 2) zaproponowano trzy podstawowe wersje algorytmu MAC, tj. adaptacyjny algorytm 12-O'clock, algorytm wykorzystujący nasłuchiwanie stanu medium oraz algorytm wykorzystujący potwierdzenia poprawnego przesłania danych wraz z formalnym opisem działania algorytmów wyrażonym w postaci grafów stanów algorytmu; 3) zaproponowano rozszerzenia podstawowych algorytmów MAC, tj. algorytm ORCHESTRA, COUNT-HOP, k-CYCLE w których uwzględniono adresy przeznaczenia przesłanych pakietów oraz możliwość wykorzystania stacji pośredniczących do przekazu pakietów oraz wielokrotnej transmisji pakietu w sieci; 4) zaproponowano metodę analizy wartości średniej wypełniania kolejek i czasu przebywania pakietów dla wybranych algorytmów MAC stanowiące rozszerzenie twierdzenia Little'a; 5) przeprowadzono badania efektywności

proponowanych algorytmów MAC wykorzystując metody analityczne i symulacyjne. Uzyskane wyniki badań w pełni potwierdziły efektywność proponowanych algorytmów sterowania MAC dostępem stacji do współdzielonego łącza transmisyjnego.

Należy podkreślić, iż rozprawa ma charakter teoretyczny, zawiera modele analityczne, które pozwoliły na wyznaczenie dla rozważanych algorytmów MAC wartości dokładnych lub zależności na górne ograniczenia dla parametrów sprawności przekazu pakietów w sieci dostępowej ze współdzielonym łączem transmisyjnym. Należy podkreślić, iż uzyskane wyniki mogą być również zastosowane w praktyce dla zaprojektowania efektywnego protokołu MAC.

Rozprawa jest napisana w języku angielskim, zawiera 133 strony, obejmuje 9 rozdziałów (z czego 5 rozdziałów merytorycznych) i zawiera odwołania do 108 publikacji. Wyniki przedstawione w rozprawie zostały opublikowane w trzech renomowanych czasopismach i międzynarodowych konferencjach, a także stanowiły podstawę dla przygotowanie dwóch nowych publikacji.

## **2 Opinia o rozprawie**

### **2.1 Cel badań**

W rozprawie jasno sprecyzowano cel badań, którym jest opracowanie nowych algorytmów sterowania dostępem stacji do współdzielonego łącza transmisyjnego, a także ocena ich efektywności wykorzystując metody analityczne i symulacyjne.

Proponowane w rozprawie rozwiązania są oryginalne w porównaniu do rozwiązań proponowanych w literaturze oraz stosowanych w sieciach dostępowych, tj. w głównej mierze wykorzystujących algorytmy bazujące na losowym dostępie lub centralnie kontrolowanym dostępie realizowanym przez stację bazową lub punkt dostępowy. Warty podkreślenia jest fakt, iż proponowane algorytmy zaprojektowano wykorzystując metody analityczne, tj. wyznaczono zależności analityczne dotyczące warunków stabilności działania sieci oraz wyznaczono zależności dot. oceny efektywności przekazu pakietów. W szczególności wyznaczono zależności dotyczące górnych ograniczeń tych parametrów.

Przedstawione w rozprawie algorytmy dostępu zostały zaimplementowane w symulatorze, a uzyskane wyniki potwierdziły wysoką efektywność proponowanego adaptacyjnego algorytmu 12-O'clock i wykazały jego niewątpliwą przewagę nad innymi algorytmami proponowanymi w literaturze. Ponadto, wyniki badań symulacyjnych potwierdziły prawidłowość wyprowadzonych zależności.

Należy podkreślić, iż efektywności opracowanych w rozprawie rozwiązań została udowodniona w kompleksowy sposób, który obejmuje wyprowadzenie zależności analitycznych których poprawność zweryfikowano w przeprowadzonych eksperymentach symulacyjnych.

### **2.2 Analiza źródeł**

Analizę stanu sztuki dotyczącą tematyki rozprawy przedstawiono głównie w rozdziale 4 i 5. W szczególności, w rozdziale 4 zdefiniowano problem sterowania dostępem stacji do wspólnego łącza transmisyjnego w sieciach dostępowych oraz podstawowe pojęcia, a także miary efektywności działania takich sieci. Ponadto w rozdziale tym przedstawiono przegląd rozwiązań protokołów dostępowych stosowanych w sieciach rodziny IEEE 802.x, protokołów dostępowych stosowanych w systemach Internetu Rzeczy oraz przedstawiono przegląd innych rozwiązań proponowanych

w literaturze. W rozdziale 5 zaproponowano aktorską, systematyczną klasyfikację (taksonomię) algorytmów MAC uwzględniającą wybrane cechy rozważanych algorytmów dostępowych.

Ponadto, w ramach w kolejnych rozdziałach zamieszczono analizę proponowanych w literaturze rozwiązań o zbliżonej funkcjonalności. W szczególności przedstawiono wybrane algorytmy dostępu, które zostały wykorzystane w części eksperymentalnej pracy jako rozwiązania referencyjne.

Oceniając zawartą w rozprawie analizę literatury, należy podkreślić, iż przedstawiona analiza źródeł jest staranna, a wnioski z tej analizy nie budzą zastrzeżeń. Analiza jest również dość obszerna, gdyż zawiera 108 odwołań, z czego zdecydowana ich większość dotyczy prac naukowych opublikowanych na wiodących konferencjach i renomowanych czasopismach naukowych, np. INFOCOM, ACCESS, ICC, Network, ToN, WN, dotyczących tematyki algorytmów i protokołów dostępu do łącza transmisyjnego. Na podkreślenie zasługuje fakt, iż trzy odwołania dotyczą prac autora rozprawy opublikowanych w czasopismach lub na konferencjach z listy MEiN.

Podsumowując, zamieszczona w rozprawie analiza źródeł jest właściwa, wyczerpująca, a dobór źródeł jest właściwie skorelowany z tematyką rozprawy. Niewątpliwie, zamieszczona analiza świadczy o bardzo dobrej znajomości autora tematyki rozprawy oraz głównych problemów w obszarze algorytmów i metod sterowania dostępem do współdzielonego łącza transmisyjnego.

### **2.3 Pozycja rozprawy i znaczenie uzyskanych wyników**

Tematyka rozprawy dotyczy aktualnego i ważnego zagadnienia, jakim jest opracowanie efektywnego algorytmu dostępu dla sieci o współdzielonym łączy transmisyjnym. Pomimo, iż do tej pory zaproponowano już wiele różnych algorytmów dostępu, tematyka ta jest ciągle ważna ze względu na pojawiające się nowe zastosowania, jak na przykład komunikacja pomiędzy urządzeniami Internetu Rzeczy, i wynikające z nich nowe wymagania i ograniczenia, np. niepełna dostępność stacji, nowe profile ruchowe, czy konieczność oszczędzania energii. W mojej ocenie najważniejszym osiągnięciem autora rozprawy jest opracowanie rodziny nowych algorytmów dostępowych bazujących na dynamicznie dostosowywanym cyklu transmitujących stacji. Cykl ten jest dostosowywany do aktualnych warunków ruchowych uwzględniając również niepełną dostępność stacji. Ponadto w rozszerzonych wersjach algorytmu wzięto pod uwagę ruting w sieci dostępowej bazujący na adresach przeznaczenia transmitowanych pakietów oraz uwzględniono możliwość wielokrotnej transmisji pakietów przez stacje pośredniczące, wynikającą z niepełnej dostępności stacji. Warty podkreślenia jest fakt, że proponowane przez autora algorytmy dostępu zostały zaprojektowane i przebadane na podstawie modeli analitycznych, w ramach których zbadano warunki stabilności działania systemu oraz wyznaczono górne ograniczenia dotyczące wartości parametrów sprawności przekazu pakietów w systemach działających zgodnie z proponowanymi algorytmami. Ciekawym osiągnięciem jest również opracowanie dla wybranych protokołów MAC zależności na wartości średnie stanu kolejki i opóźnienia bazujących na twierdzeniu Littla.

Oceniając pozycję rozprawy na tle rozwiązań przedstawionych w literaturze, należy podkreślić oryginalność proponowanych algorytmów oraz ich wysoką efektywność, którą wykazały przeprowadzone badania symulacyjne oraz badania bazujące na wyprowadzonych zależnościach analitycznych. Przedstawione wyniki potwierdziły, że proponowane algorytmy pozwalają uzyskać większą efektywność przekazu pakietów w porównaniu do innych rozwiązań przedstawionych w literaturze. O znaczeniu uzyskanych wyników świadczą między innymi trzy publikacje autora rozprawy w renomowanych międzynarodowych czasopismach i konferencjach, tj. IEEE

#### **2.4 Poprawność przedstawienia uzyskanych wyników (zwięzłość, jasność, umiejętność przekonywania, poprawność redakcyjna)**

Generalnie proponowane w rozprawie rozwiązania, a także uzyskane wyniki są przedstawione w sposób zwięzły, staranny i precyzyjny. Wartościowym jest zamieszczenie zwięzłego podsumowania osiągnięć przedstawionych w każdym z rozdziałów. Pewnym mankamentem jest nieco skrócony opis rozszerzonych wersji algorytmów MAC przedstawiony w rozdziale 7, który kontrastuje ze szczegółowym pisem podstawowych wersji przedstawionych w rozdziale 6.

Redakcja rozprawy, a także język nie budzą zastrzeżeń (poza kilkoma drobnymi błędami redakcyjnymi, tzw. literówkami). W mojej ocenie te drobne mankamenty redakcyjne nie mają wpływu na dobrą jakość rozprawy.

### **3 Słabe strony rozprawy i jej główne wady**

Do słabych stron rozprawy zaliczam:

1. Przedstawione rozwiązania analityczne zostały jedynie częściowo zweryfikowane w eksperymentach symulacyjnych. Niestety zakres tych eksperymentów jest dość ograniczony, gdyż przebadano głównie podstawowe wersje algorytmów tj. adaptacyjny algorytm 12-O'clock, algorytm wykorzystujący nasłuchiwanie stanu medium oraz algorytm wykorzystujący potwierdzenia poprawnego przesłania danych w wybranych warunkach ruchowych. W rozprawie brakuje badań symulacyjnych dla rozszerzonych wersji algorytmu, pozostawiając ich ocenę jedynie na podstawie wyprowadzonych zależności analitycznych. W mojej ocenie wartościowym byłoby przedstawienie porównania wyników analitycznych z wynikami symulacyjnymi również dla rozszerzanych wersji algorytmu. W szczególności biorąc pod uwagę ich większą złożoność wymagającą utrzymania jednolitego stanu systemu. Ponadto, badania symulacyjne ograniczono do porównania proponowanych algorytmów do wybranych innych algorytmów MAC proponowanych w literaturze. Pewien niedosyt budzi fakt, iż nie przeprowadzono porównania wydajności do algorytmów powszechnie stosowanych w sieciach, np. algorytmów CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance), powszechnie stosowanych w sieciach WiFi, Zigbee lub algorytmów typu Token Bus/Token Ring, które wydają się najbliższe proponowanym w rozprawie rozwiązaniom.
2. Przedstawione w rozprawie zależności w większości pozwalają na wyznaczenie wartości granicznych (ograniczeń dla wartości maksymalnych lub średnich). Oczywiście zależności te są bardzo wartościowe i należy w pełni docenić wysiłek autora związany z opracowaniem rozwiązań analitycznych. Natomiast pewien niedosyt budzi brak choćby próby propozycji pełnego modelu analitycznego pozwalającego opisać stan pojedynczej stacji lub całego systemu. Modele takie, bazując na teorii kolejek, zostały opracowane dla wielu algorytmów dostępu. Przykładem może być model np. G. Bianchi „Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function” JSAC vol 18 no 3, 2000 wraz z jego późniejszymi rozszerzeniami.
3. W proponowanych algorytmach przyjęto dość dużo arbitralnych założeń, które przyjęto bez dyskusji dotyczącej konsekwencji przyjętych założeń, a także ich wpływu na zastosowanie

projektowanego protokołu MAC w praktyce. Przykładowo, założono pełną synchronizację zegarów stacji, natomiast brak jest dyskusji o tym jak taką synchronizację utrzymać w rozproszonym systemie, a także jakie będą konsekwencje nawet chwilowej utraty tej synchronizacji przez poszczególne. W podstawowych wersjach proponowanego algorytmu nie rozważono adresów przeznaczenia wysyłanych pakietów danych (zagadnienie to rozważono w rozszerzonej wersji algorytmu), natomiast brak jest dyskusji o tym dla jakich praktycznych systemów można zastosować taki algorytm dostępu. W rozszerzonych wersjach algorytmów złożono utrzymanie pełnej wiedzy o stanie stacji, natomiast nie przeprowadzono dyskusji o tym w jaki sposób uzyskać taki stan w rozproszonym systemie? Ponadto, w analizie przyjęto, że pakiety napływają do stacji zgodnie z profilem ON/OFF opisanym przez algorytm TB (*Token Bucket*). Brakuje natomiast dyskusji dotyczącej czy taki profil jest reprezentatywny dla źródeł ruchu występujących w projektowanym systemie, w szczególności w systemach Internetu Rzeczy. Biorąc pod uwagę, iż dość trudno przewidzieć jakie profile ruchowe wystąpią w przyszłych sieciach, wartym rozważenia byłyby również inne profile ruchowych, np. profili źródeł zachłanych charakterystycznych dla sieci danych.

#### 4 Podsumowanie:

Rozprawa dotyczy opracowania nowych, efektywnych algorytmów sterowania MAC dostępem stacji do współdzielonego łącza transmisyjnego MAC dla systemów z ograniczoną dostępnością stacji. W rozprawie zaproponowano kilka wersji algorytmu MAC i dla każdej z nich zaproponowano zależności analityczne umożliwiające wyznaczenie wartości dokładnych lub górnych ograniczeń dla parametrów sprawności przekazu pakietów w sieci wykorzystującej proponowany algorytm. Uzyskane wyniki symulacyjne i analityczne w pełni potwierdziły efektywność proponowanych algorytmów MAC. Na podkreślenie zasługuje fakt, iż praca ma w głównej mierze charakter teoretyczny, a uzyskane wyniki mogą mieć zastosowanie praktyczne.

W mojej ocenie proponowane algorytmy dostępu MAC są niewątpliwie nowym, wartościowym rozwiązaniem, które stanowią oryginalne rozwiązanie problemu dostępu do współdzielonego łącza transmisyjnego i mogą mieć praktyczne zastosowanie w przyszłych sieciach telekomunikacyjnych. Wyniki prac zostały opublikowane w międzynarodowych czasopismach i konferencjach znajdujących się na liście MEiN.

Biorąc powyższe po uwagę, oceniam, że **osiągnięcia autora rozprawy spełniają warunki stawiane kandydatom ubiegającym się o stopień doktora** w odnośnych ustawach i po spełnieniu innych warunków formalnych, wnoszę o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.

*Andrzej B. J. Ben*